



Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

University of Zagreb, Faculty of Agriculture

UTJECAJ DODAVANJA OTPADNOG JESTIVOG ULJA U DIZELSKO GORIVO NA KARAKTERISTIKE MOTORA I EMISIJU ISPUŠNIH PLINOVA

DIPLOMSKI RAD

Kristian Čelina

ZAGREB, travanj, 2019.



Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet
University of Zagreb, Faculty of Agriculture

Diplomski studij:
Poljoprivredna tehnika - Mehanizacija

UTJECAJ DODAVANJA OTPADNOG JESTIVOG ULJA U DIZELSKO GORIVO NA KARAKTERISTIKE MOTORA I EMISIJU ISPUŠNIH PLINOVA

DIPLOMSKI RAD

Kristian Čelina

Mentor: doc.dr.sc. Krešimir Čopec

ZAGREB, travanj, 2019.

Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

**IZJAVA STUDENTA
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Kristian Čelina**, JMBAG 0178095277, rođen/a dana 21.10.1994. u Pforzheimu (Njemačka), izjavljujem da sam samostalno izradila/izradio diplomski rad pod naslovom:

**UTJECAJ DODAVANJA OTPADNOG JESTIVOG ULJA U DIZELSKO GORIVO NA
KARAKTERISTIKE MOTORA I EMISIJU ISPUŠNIH PLINOVA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica/jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata/upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis studenta / studentice

Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta/ice **Kristian Čelina**, JMBAG 0178095277, naslova

UTJECAJ DODAVANJA OTPADNOG JESTIVOG ULJA U DIZELSKO GORIVO NA KARAKTERISTIKE MOTORA I EMISIJU ISPUŠNIH PLINOVA

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____, dana _____.

Povjerenstvo:

potpisi:

- | | | | |
|----|--------------------------------|---------------------|-------|
| 1. | Doc.dr.sc. Krešimir Čopec | mentor | _____ |
| 2. | Prof.dr.sc. Dubravko Filipović | član povjerenstva | _____ |
| 3. | Doc.dr.sc. Vanja Jurišić | član povjerenstva | _____ |
| 4. | Zlatko Koronc, dipl.ing. | neposredni voditelj | _____ |

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Pregled literature	2
2.1. Biljna ulja kao dizelsko gorivo	2
2.2. Otpadna jestiva ulja od pripreme hrane	3
2.2.1. Postupanje s otpadnim jestivim uljem	5
2.2.2. Prethodna obrada otpadnog jestivog ulja	6
2.3. Upotreba biodizelskog goriva kao alternativnog goriva	8
3. Hipoteze i cilj rada	13
4. Materijali i metode rada	14
4.1. Karakteristike korištenog goriva	14
4.2. Karakteristike motora	15
4.3. Ispušni plinovi	18
5. Rezultati i rasprava	21
5.1. Karakteristike motora	21
5.1.1. Snaga	21
5.1.2. Zakretni moment	22
5.1.3. Satna potrošnja goriva	23
5.1.4. Specifična potrošnja goriva	24
5.2. Emisije plinova	26
5.2.1. Emisija CO	26
5.2.2. Emisija CO ₂	28
5.2.3. Emisija NO _x	29
5.2.4. Emisija HC	31
5.3. Rasprava	33
6. Zaključci	34
Literatura	35

Sažetak

Diplomskog rada studenta/ice **Kristian Čelina**, naslova

UTJECAJ DODAVANJA OTPADNOG JESTIVOG ULJA U DIZELSKO GORIVO NA KARAKTERISTIKE MOTORA I EMISIJU ISPUŠNIH PLINOVA

Otpadno jestivo ulje donedavno je predstavljalo ekološki problem zbog nerazvijenog sustava zbrinjavanja i recikliranja. U 2017. godini je pokrenut projekt prikupljanja otpadnog jestivog ulja iz domaćinstava u Republici Hrvatskoj dok ugostitelji već duže vrijeme imaju zakonsku obvezu sigurnog zbrinjavanja otpadnog ulja. Iako otpadna jestiva ulja spadaju u biorazgradivi otpad, mogu uzrokovati onečišćenje i zagađenje okoliša ukoliko se nepravilno zbrinjavaju. Otpadna jestiva ulja koja nastaju u procesu obrade hrane koristan su otpad koji može biti korišten kao sekundarna sirovina za izradu novih proizvoda poput boja, lakova, kozmetike te biodizelskog goriva. Većina postupaka recikliranja takve vrste sekundarne sirovine je prilično skupa s obzirom na vrijednost krajnjeg produkta. Najjeftiniji način iskorištavanja otpadnog jestivog ulja je umješavanjem u dizelsko gorivo. U ovom diplomskom radu, cilj je utvrditi utjecaj umješavanja otpadnog jestivog ulja u dizelsko gorivo na karakteristike motora (snagu, zakretni moment i potrošnju goriva) i emisiju ispušnih plinova. Istraživanje je provedeno korištenjem različitih mješavina dizelskog goriva i otpadnog jestivog ulja pri čemu je udio otpadnog jestivog ulja iznosio 10%, 20% odnosno 30%. Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da je moguće umješavati otpadno jestivo ulje eurodizel gorivu za korištenje u traktorskom dizel motoru. Rezultati pokazuju da je mješavina s 30% udjela otpadnog jestivog ulja ostvarila rezultate usporedive sa standardnim eurodizel gorivom. Razlike u karakteristikama motora pri korištenju eurodizel goriva i B30 mješavine su zanemarive. Korištenjem B30 mješavine ostvarena je veća prosječna snaga za 0,37% te veći zakretni moment za 0,15% u odnosu na eurodizel gorivo. Emisije štetnih ispušnih plinova CO, CO₂ i NO_x su približno jednake dok je emisija HC prosječno niža za 29,45% kod B30 mješavine u usporedbi s eurodizelom.

Ključne riječi: otpadno jestivo ulje, karakteristike motora, dizel, ispušni plinovi

Summary

THE IMPACT OF THE ADDITION OF WASTE COOKING OIL IN DIESEL FUEL ON ENGINE CHARACTERISTICS AND EMISSION OF EXHAUST GASES

Waste cooking oil was until recently, an ecological problem due to the underdeveloped recycling system. In 2017, a project of collecting waste cooking oils from households in the Republic of Croatia was launched, while caterers have a legal obligation to secure the disposal of waste oil. Although waste cooking oils are classified as biodegradable waste, they can cause pollution if they are improperly handled. Waste cooking oils, obtained after food processing, can be used as raw material for the production of new products such as paints, varnishes, cosmetics and bio diesel. Most of the recycling procedures for this type of secondary raw material are quite expensive given the value of the end product. The cheapest way to use waste cooking oil is by adding it to the diesel fuel. The objective of this paper is to determine the impact of blending waste cooking oil with diesel fuel on the engine characteristics (power, torque and fuel consumption), as well as emission of exhaust gases. The research was carried out using various blends of diesel fuel and waste cooking oil with a share of waste cooking oil of 10%, 20% and 30%. On the basis of the obtained results it can be concluded that it is possible to blend waste cooking oil with diesel fuel for use in a tractor diesel engine. The results show that a 30% blend of waste cooking oil achieved the results comparable to the standard eurodiesel fuel. Differences in engine characteristics when using eurodiesel and B30 mixtures are minimal. The use of the B30 blend resulted in a higher average power and a 0,15% higher torque compared to eurodiesel fuel. Emissions of harmful exhaust gases CO, CO₂ and NO_x are approximately equal, while HC emission is in average lower by 29,45% for the B30 mixture compared with eurodiesel.

Key words: waste cooking oil, engine characteristics, diesel, exhaust gases

1. Uvod

Značajan porast industrijalizacije u zadnjih nekoliko desetljeća zajedno s rastom populacije doveo je do povećanja potreba za glavnim energetske resursima. Rast potražnje za energijama uzrok je ubrzanog iskorištavanja i trošenja prirodnih resursa poput nafte i zemnog plina. Fosilna goriva su osnovni izvor energije na Zemlji koji nastaju od prirodnih resursa poput anaerobnog raspadanja mrtvih organizama. Za taj proces je potrebno nekoliko milijuna godina što znači da su takvi izvori energije neobnovljivi i nepouzdana. Uz nemogućnost obnavljanja, takva goriva predstavljaju i opasnost po okoliš te zdravlje ljudi zbog načina oslobađanja energije kroz proces izgaranja. Izgaranjem dolazi do oslobađanja štetnih plinova poput CO₂ i NO₂. Ovi plinovi negativno utječu na okoliš tako što se sakupljaju u atmosferi i stvaraju takozvani efekt staklenika, posljedice toga su kisele kiše koje uništavaju okoliš te uzrokuju eroziju stijena (Kondić i sur. 2015.).

Biogorivo je svako kruto, tekuće ili plinovito gorivo proizvedeno iz biomase. Postoje različite vrste biogoriva koje se najčešće dijele na prvu, drugu i prema nekim autorima treću generaciju ovisno o vrsti materijala za proizvodnju, tehnologiji proizvodnje i emisiji CO₂. Prva generacija biogoriva proizvodi se iz žitarica s visokim sadržajem škroba (npr. etanol) ili šećera te iz uljarica (npr. biodizel). Druga generacija dobiva se iz prerade raznog poljoprivrednog ili šumskog ostatka ili iz energetske kulture. Biogorivo proizvedeno iz otpadnih jestivih ulja spada u drugu generaciju. U treću generaciju spadaju biogoriva dobivena iz mikroalgi i makroalgi (Kondić i sur. 2015.).

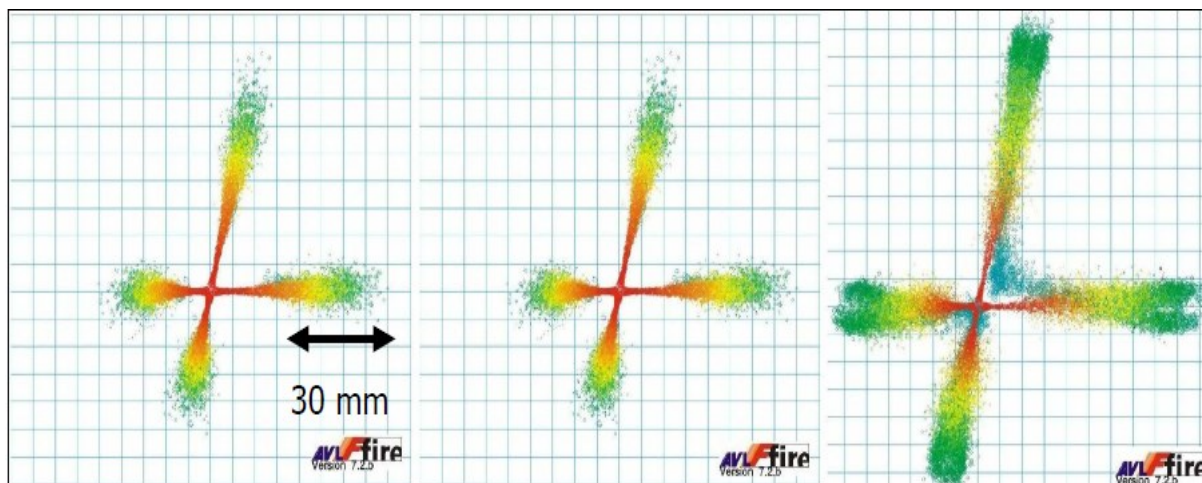
Današnji biodizel ima osnovna svojstva približno jednaka onima mineralnog dizela, a može se koristiti u potpunosti kao zamjena za mineralni dizel ili u smjesi s njim. Biodizelsko gorivo je proizvod iz obnovljivih izvora energije, biorazgradiv je, nije toksičan, CO₂ neutralan je (ne pridonosi efektu staklenika), a njegova primjena pridonosi smanjenju emisije štetnih tvari u urbanim sredinama (Kondić i sur. 2015.).

Biodizelsko gorivo predstavlja alternativno gorivo koje bi moglo nadomjestiti mineralno gorivo, a zamjena fosilnih goriva biogorivima je prijetila potreba kojoj je svrha čuvanje ekološke ravnoteže Zemlje (Mustapić i sur. 2006.). Prema izvješću Europske komisije iz 2017. godine biodizel je glavno biogorivo koje se upotrebljava u prometu u EU-u. Na njega je otpadalo 79% ukupne uporabe biogoriva 2015. (10,9 milijuna tona ekvivalenta nafte). Bioetanol je drugi po redu, s udjelom od 20% (2,6 milijuna tona). Udio biogoriva proizvedenih od otpada, ostataka te lignoceluloznih i neprehrambenih celuloznih materijala u mješavini biogoriva u EU-u iznosio je 1% 2009., a do 2015. porastao je na 23%.

2. Pregled literature

2.1. Biljna ulja kao dizelsko gorivo

Početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća provedena su intenzivna ispitivanja biljnih ulja kao alternativa fosilnom gorivu, npr. suncokretovo ulje u Južnoafričkoj Republici, zbog nemogućnosti uvoza nafte uzrokovanog naftnim embargom. Bruwer i sur. (1981.) proveli su eksperimentom sa suncokretovim uljem i ustanovili pad snage motora od osam posto u odnosu na dizelsko gorivo nakon 1.000 sati rada. Izmjenom pumpe i injektora, ubrizgavača goriva, snaga motora je poboljšana. Nakon 1.300 sati rada nađeni su tragovi koksa na vrhu injektora. Na poljoprivrednim traktorima je isto tako ispitano suncokretovo ulje. Radne karakteristike motora su ostale nepromijenjene, ali su na uređaju za ispitivanje ostali talozi koji bi uzrokovali moguća oštećenja pri daljnjoj upotrebi. Takav rezultat je moguć jer je suncokretovo ulje bogato nezasićenim masnim kiselinama. U ispitivanjima karakteristika 11 različitih ulja ustanovljeno je da kukuruzno, sojino i repičino ulje posjeduju zadovoljavajuća svojstva, te se mogu upotrebljavati kao alternativno gorivo dizelu. Testiranjem repičinog ulja ustanovljena je pojava taloga na klipu, prstenima i injektoru motora. Temeljni je zaključak niza drugih studija da se biljna ulja mogu kratkoročno upotrijebiti kao zamjena dizel gorivu, jer se pri dugoročnoj upotrebi javljaju znatni problemi vezani za karakteristike ulja. Visoka viskoznost otežava ubrizgavanje goriva i njegovo raspršivanje, koje ima za posljedicu loše miješanje s zrakom, a time i nepotpuno izgaranje. Relativno visoko vrelište pridonosi stvaranju taloga na injektorima, te razgradnji i razrjeđivanju ulja za podmazivanje. Kombinacija visokog vrelišta, slaba hlapljivost i viskoznosti uzrokuju probleme pri startu i vremenskoj zadržci kod paljenja. Ovim problemima pridonose i produkti oksidacije kojima su podložne nezasićene veze u trigliceridima, pri čemu nastaju sluzave polimerne tvari (engl. *gum formation*) koje povećavaju viskoznost goriva, otežavaju njegov transport od spremnika do komore za izgaranje, a mogu dovesti i do začepljenja vodova. Isto tako, nezasićene veze podliježu kompleksnim oksidacijskim i termičkim procesima polimerizacije unutar komore za izgaranje. Nastale „gume“ ne izgaraju lako i zbog toga nastaju talozi (Jurac, 2011.). Volmajer i Kegl (2003.) su u svojem istraživanju karakteristika ubrizgavanja dizela i nekoliko vrsta alternativnih biogoriva zaključili da su uporabom otpadnog jestivog ulja dobivene najveće kapi i najdulji domet mlaza (slika 1.). Budući da je atomizacija goriva kod uporabe metilnih estera bolja, otpadno jestivo ulje se treba esterificirati da bi se moglo uporabiti kao gorivo.



Slika 1. Mlaz goriva (s lijeva: dizel, biodizelsko gorivo, otpadno jestivo ulje)
(Izvor: Volmajer i Kegl, 2003.)

2.2. Otpadna jestiva ulja od pripreme hrane

Mnogi istraživači koji su se bavili ovom i sličnim temama tvrde da bi proizvodnja biogoriva iz žitarica i sličnih poljoprivrednih proizvoda dovela do rasta cijena hrane i vode ukoliko u proizvodnji nebi bili korišteni otpadni materijali (Patel i sur. 2015.).

Za pripremu prženih jela potrebne su određene količine jestivih ulja koja nakon uporabe postaju otpadna jestiva ulja. Prema Pravilniku o gospodarenju otpadnim uljima (NN 124/06, 121/08, 31/09, 156/09) otpadno jestivo ulje je svako ulje koje nastaje obavljanjem ugostiteljske i turističke djelatnosti, industriji, obrtu, zdravstvenoj djelatnosti, javnoj upravi i drugim sličnim djelatnostima u kojima se priprema više od 20 obroka dnevno. Otpadno jestivo ulje može predstavljati problem za okoliš, osobito vodu uslijed nepravilnog zbrinjavanja. Zbog toga su mnoge razvijene zemlje uvele politiku kažnjavanja kod odlaganja/ispuštanja otpadnih jestivih ulja u odvođe (Brdarić i sur. 2011.).

Otpadna jestiva ulja mogu se oporabiti ili zbrinuti. Oporaba može biti materijalna i termička. Materijalnom oporabom nastaje novi proizvod ili proces kojim nastaje takvo ulje koje se može ponovno upotrijebiti. Otpadna jestiva ulja mogu se koristiti kao sirovina za dobivanje biodizelskog goriva. Termička oporaba je iskorištavanje otpadnog ulja kao goriva u postrojenjima snage veće od 3 MW (gorivo u cementarama). Zbrinjavanje otpadnih ulja podrazumijeva konačno zbrinjavanje otpadnih ulja nekim drugim odgovarajućim propisanim postupkom osim oporabe otpadnih ulja. Otpadna jestiva ulja klasificiraju se prema katalogu otpada (NN 50/05, 39/09) kao neopasni otpad i nalaze se u grupi 20, sakupljaju se i kasnije oporabljaju i/ili zbrinjavaju od strane ovlaštenih osoba. Proizvođači otpadnih jestivih ulja moraju osigurati da se otpadna jestiva ulja, koja nastaju pripremom hrane skupljaju odvojeno od drugog otpada u posebnim spremnicima. Prvi korak u zbrinjavanju otpadnih

jestivih ulja je odvajanje krutog od tekućeg dijela, svaki dio se obrađuje odvojeno. Tekući dio je obično bolje kvalitete i manje kiselosti. Otpadna jestiva ulja se zatim zagrijavaju na temperaturu oko 60 °C i ispiru vodom ili vodenom parom na temperaturama od oko 95 °C (Brdarić i sur. 2011.). Pri tehnološkom postupku dobivanja biodizela iz biljnih ulja odigravaju se uglavnom dva kemijska procesa koji rezultiraju dobivanjem biodizela. S obzirom da u biljnim uljima prevladavaju trigliceridi viših masnih kiselina, s njima reagira metanol istiskujući pritom glicerol pri čemu nastaju metilesteri masnih kiselina, tj. biodizel. Za ubrzavanje ovog kemijskog procesa („kataliza“), koji se može odigravati pod različitim tehnološkim uvjetima, koristi se ranije pripremljena otopina katalizatora u metanolu. Ovaj proces konverzije glicerolnih estera masnih kiselina u metilestere, tj. biodizel, uobičajeno se naziva transesterifikacija, reesterifikacija ili jednostavno „konverzija“ (Jurac, 2011.).

Europska i svjetska statistika tvrde da se 40-50% jestivog ulja upotrijebljenog za pripremu hrane utroši u restoranima i industriji, a ostatak u kućanstvima, od čega se oko 50% upije u hranu, a ostatak ostane kao otpad. Ako se uzme da se ulje za proizvodnju biodizela prikuplja isključivo iz restorana, dobije se da je potencijalna količina takve sirovine 20-25% na količinu ulja koje se utroši za pripremu hrane. Prema podacima iz Europske unije ukupna količina otpadnog jestivog ulja je oko pet kilograma po glavi stanovnika godišnje (Cvengroš i sur. 2004.).

Prženje hrane odvija se na temperaturama od 160-200 °C, pri čemu se dio ulja apsorbira u proizvod, a dio proizvoda koji se prži raspada se i odvaja, te zaostane u ulju. Reakcijama u samom ulju i reakcijama ulja i hrane, kao i samim prisustvom upijenog ulja u hrani, stvaraju se fizikalno-kemijske promjene na površini i u samom proizvodu, a to se očituje u promjeni nutritivnih, senzorskih i reoloških karakteristika prženog proizvoda (tablica 1.1.). U ulju koje se prži također dolazi do promjene fizikalno-kemijskih svojstava koje su posljedica kemijskih reakcija u samom ulju i reakcija ulja s vodom i kisikom na povišenoj temperaturi. Do hidrolitičkog cijepanja ulja dolazi u prisutnosti vode koja u ulje dolazi iz hrane. Dio vode brzo ispari, dok se dio apsorbira u ulju, cijepajući ulje na slobodne masne kiseline i glicerol. Kisik apsorbiran iz zraka reagira s nezasićenim acilglicerolima dajući razne oksidacijske produkte. Zasićeni i nezasićeni aldehidi, ketoni, ugljikovodici, alkoholi, kiseline i esteri nastaju kao produkti razgradnje triglicerida. Većina tih produkata koji nastaju u reakcijama radikala, tj. dimerne i polimerne kiseline, dimerni acilgliceroli i poligliceroli ostaju u ulju povećavajući mu viskoznost. Ostatak se dalje raspada do hlapivih spojeva, tj. hidroksikiselina i epoksikiselina koje ispare iz ulja. Povećani udio polarnih i polimernih spojeva jest važan parametar za određivanje stupnja degradacije ulja, a uslijed povećanog udjela polarnih spojeva otpadno jestivo ulje apsorbira i veću količinu vode za razliku od svježeg ulja (Kleinova i sur 2009.).

Tablica 1.1. Glavne promjene i nastali spojevi u ulju prilikom prženja (Izvor: Jurac, 2011.)

Promjena	Čimbenik promjene	Nastali spojevi
Hidroliza	Voda	slobodne masne kiseline
		diacilgliceroli
		monoacilgliceroli
Oksidacija i oksidativna polimerizacija	Kisik	oksidirani monomerni triacilgliceroli
		oksidirani dimerni i oligomerni triacilgliceroli
		hlapivi spojevi (aldehidi, ketoni, alkoholi, ugljikovodici i sl.)
Termalna polimerizacija i degradacija	Temperatura	ciklički monomerni triacilgliceroli
		ciklički dimerni triacilgliceroli
		nepolarni dimerni i oligomerni triacilgliceroli

Tvrtka Biotron d.o.o. prikuplja otpadno jestivo ulje iz svih McDonald's restorana na području Republike Hrvatske, koje dolazi od prženja njihovih proizvoda. Prikupljene količine se upisuju u prateću dokumentaciju. U 2009. i 2010. godini iz McDonald's restorana prikupljeno je 164 960 kg otpadnog jestivog ulja, a restorani su u istom razdoblju nabavili 322 000 kg ulja, što govori da oko 50% ulja završi kao otpad, a ostatak upiju prženi proizvodi, koji u svom sastavu imaju 6-11% upijenog ulja, dok se vrlo mali dio ulja gubi svakodnevnom filtracijom ili izlazi s vodenom parom u procesu prženja. Dobiveno otpadno jestivo ulje je sirovina za industrijsku proizvodnju biodizelskog goriva. U tehnološkom procesu prvo ide na čišćenje i filtraciju, zatim se miješa s čistim biljnim repičinim uljem, te se smjesa rafinira i ide u proces transesterifikacije, tj. postupak za dobivanje biodizelskog goriva (Jurac, 2011.).

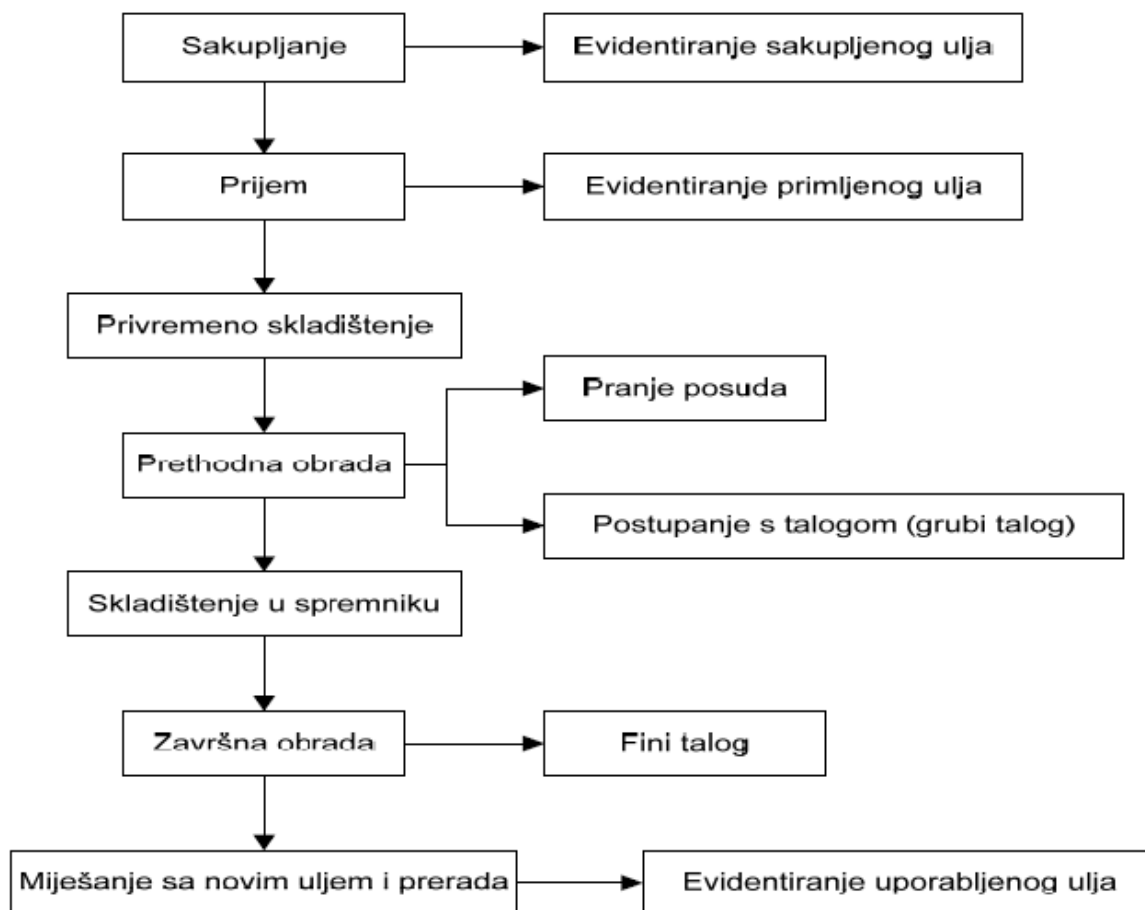
2.2.1. Postupanje s otpadnim jestivim uljem

Postupanje s otpadnim jestivim uljem podijeljeno je u dvije grupe:

- osnovne operacije;
- sekundarne operacije.

Osnovne operacije prema fazama koje se odvijaju u slijedu unutar istog vremenskog perioda su: sakupljanje, prijam, skladištenje, prethodna obrada, skladištenje otpadnog jestivog ulja u spremnik (slika 2.). Ponekad je moguće da se pojedine etape u obradi odvijaju istodobno, npr. za vrijeme dok se odvija završna obrada i miješanje s novim uljem, može se odvijati i prethodna obrada i sakupljanje. Osnovne operacije se dalje prema načinu i svrsi, te prostoru u kojem se odvijaju, dijele na dva procesa, a to su sakupljanje i obrada. U sekundarne operacije spadaju evidencije sakupljenog i primljenog ulja. Ukoliko je sakupljeno

otpadno jestivo ulje dovoljno čisto koje dolazi od vanjskih sakupljača i dobavljača, može se izostaviti prethodna obrada i skladištenje u spremnik te proslijediti u završnu obradu i nakraju pomiješati s biljnim uljem (Jurac, 2011.).



Slika 2. Postupak sa otpadnim uljima
(Izvor: Jurac, 2011.)

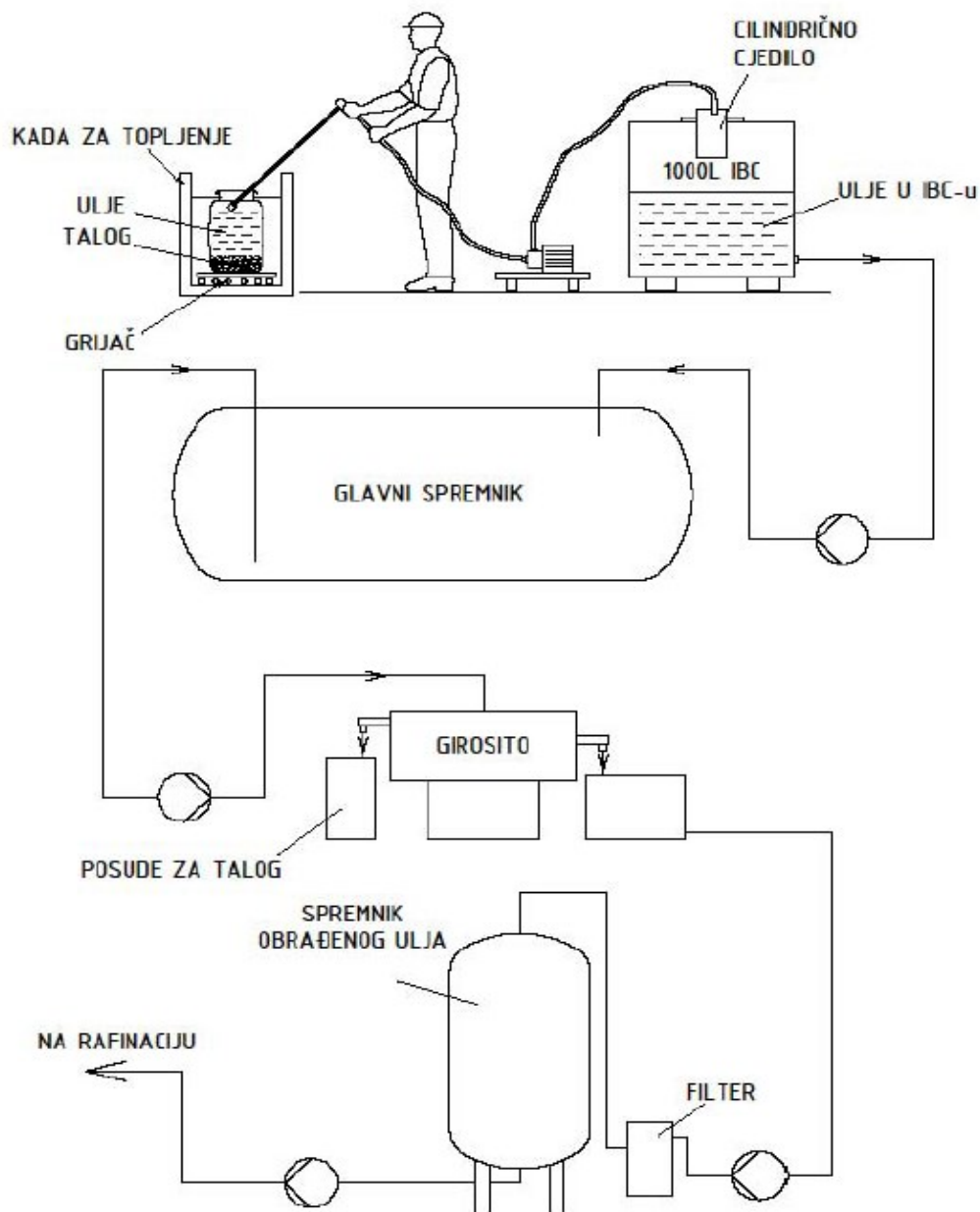
2.2.2. Prethodna obrada otpadnog jestivog ulja

Prethodna obrada sastoji se od:

- taljenja i sedimentacije;
- prebacivanja otpadnog jestivog ulja u skladišni spremnik.

Sakupljeno nečisto otpadno jestivo ulje se zajedno s bačvama puni u kadu za topljenje koja se zagrijava cijevnim grijačem kroz koji struji vruća voda zagrijava na 125°C pod tlakom od 2,2 bara. Tu se sadržaj bačvi otapa i zagrijava, pri čemu se snizi viskoznost ulja, što

omogućuje njihovo lakše pražnjenje, prepumpavanje i pretakanje, a pritom dolazi i do sedimentacije prisutnih nečistoća (slika 3.).



Slika 3. Tehnološka obrada otpadnog jestivog ulja

(Izvor: Jurac, 2011.)

Kako kada djeluje i kao peć, tj. podiže temperaturu okolnog zraka do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, radi uštede energije otpadna toplina ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) koristi se za predgrijavanje dvije šarže bačvi s otpadnim jestivim uljem izvan kade. Na taj način brže se otople, čime se vrijeme topljenja skрати. U ljetnom razdoblju otpadno jestivo ulje u većini bačvi se otopi stajanjem na suncu ili pak budu zaprimljene s otopljenim otpadnim uljem (Jurac, 2011.).

Dekantiranje i filtracija

Ulje se dekantira zupčastom samousisnom pumpom iz bačvi u kadi ili izvan kade ili izravnim izlivanjem ulja iz bačvi kroz cilindrično cjedilo promjera otvora 1 mm u međuspremnik kapaciteta 1 m³. Nakon što se cjedilo zapuni, ručno se izvadi, talog se prazni u za to predviđenu posudu ili u jednu od već ispražnjenih posuda s uljem. Prebacivanje ulja u skladišni spremnik vrši se pumpom iz skladišnog spremnika otpadnog jestivog ulja koja je usisnim cjevovodom spojena s međuspremnikom filtracije (Jurac, 2011.).

Skladištenje u spremniku

Ulje koje je prošlo prethodnu obradu skladišti se u horizontalnom nadzemnom spremniku volumena 100 m³, koji se grije vrućom vodom preko cijevnog grijača na temperaturu od 60 °C, koja je potrebna kako bi se ulje održalo tekućim radi pražnjenja spremnika i završne obrade. Spremnik je opremljen pumpom koja služi njegovom punjenju uljem, ili međuspremnika prethodne obrade ili iz vanjskih velikih posuda i cisterni (Jurac, 2011.).

2.3. Upotreba biodizelskog goriva kao alternativnog goriva

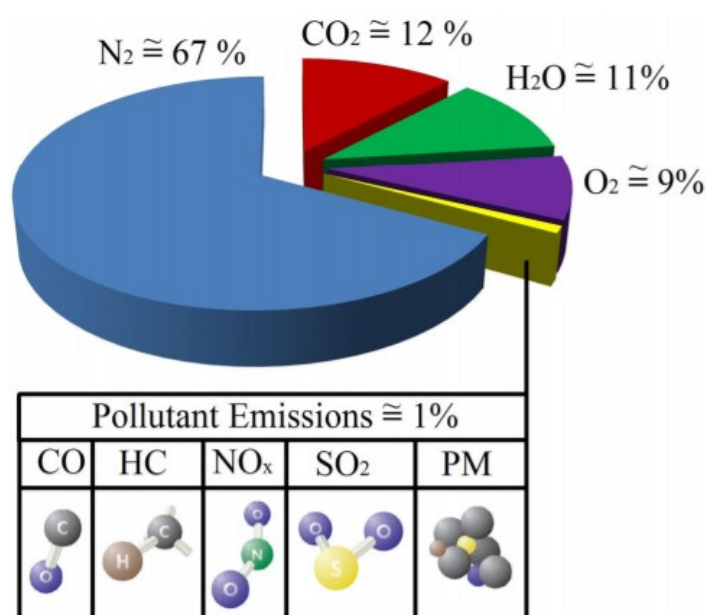
U novije vrijeme, provedena su brojna istraživanja na temu utjecaja biogoriva na karakteristike dizel motora te na emisije ispušnih plinova.

- Tutunea i Dumitru (2017.) su u svom radu istraživali metilni ester suncokreta i njegove mješavine kao alternativno gorivo za dizel motore. Suncokretovo ulje su procesom transesterifikacije pretvorili u biodizel, koristili su 30 L goriva. Korištene su mješavine biodizela B10, B20, B30, B40 i B100. Istraživanje su proveli na četverocilindričnom dizel agregatu Torpedo licenca Deutz F4L912 T3Z. Testovi su pokazali da su emisije CO i HC niže u odnosu na dizel gorivo dok je emisija NO_x bila viša.

- Bibić i sur. (2013.) su proveli istraživanje na temu utjecaja biodizelskog goriva na karakteristike motora; snagu, okretni moment i specifičnu potrošnju goriva te na ekološke značajke odnosno emisije štetnih plinova. Testiranje je provedeno na četverotaktnom dizel motoru sa 6 cilindara nominalne snage 160 kW. Biodizel je korišten u omjerima B25, B50 i B75. Nakon provedenih testiranja zaključak je da se korištenjem biodizela smanjila koncentracija štetnih komponenti u ispuhu (uz izuzetak emisije NO_x). Karakteristike motora su zadržane u odnosu na korištenje standardnog dizel goriva uz povećanje specifične potrošnje goriva.

- Bibić i sur. (2011.) su zaključili da je najveći utjecaj, ujedno i parametar koji je relativno jednostavno podešavati bez direktnog konstruktivnog zahvata na motoru SUI, zapravo kut ubrizgavanja goriva. Navode da zbog evidentno različitih fizičkih osobina sam proces dobave goriva kao i izgaranja su fenomenološki različiti i neophodno je pri korištenju isključivo jednog odnosno dva goriva naći optimalan omjer navedenog parametra. Sa smanjenjem tvornički preporučenog kuta ubrizgavanja goriva performanse koje motor SUI može ostvariti korištenjem biodizela popravljaju se i u konačnici su vrlo bliske onim performanse koje motor SUI ostvaruje gorivom za koje je i konstruiran.

- Aslan Resitoglu i sur. (2015.) su istraživali emisiju štetnih plinova kod dizel motora te tretiranje ispušnih plinova pomoću 3 sustava za kontrolu i redukciju (SCR, DOC,DPF). U radu su testirali četiri glavna svojstva ispušnih plinova; CO, HC, NO_x i krute čestice. Navode da je u ispuhu dizel motora tek 1 % štetnih čestica, od toga je najveći udio NO_x koji čini više od 50 % (slika 4.). Nakon NO_x najveći udio čine krute čestice dok je koncentracija CO i HC minimalna.



Slika 4. Prikaz štetnih emisija u ispuhu dizel motora
(Izvor: Aslan Resitoglu i sur., 2015.)

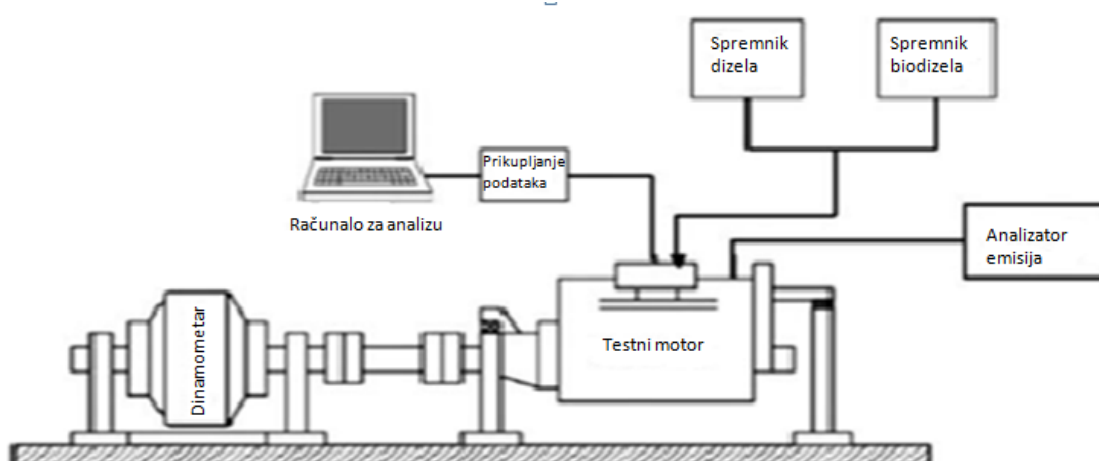
- Patel i sur. (2015.) su proveli istraživanje u Indiji s obzirom da je pržena hrana izuzetno popularna na obalnom području te zemlje gdje su ulja poput suncokretovog, palminog i kokosovog vrlo dostupna. Jedan od problema je nepravilno zbrinjavanje otpadnog ulja,

većinom bacanjem u odvođe što dovodi do zagađenja vode i sličnih ekoloških problema. Ulje je prikupljeno iz restorana te procesom transesterifikacije pretvoreno u biodizelsko gorivo korišteno u istraživanju.

Tablica 2.1. Svojstva dizel goriva u usporedbi sa biodizelskim gorivom proizvedenim od otpadnog ulja (Izvor: Patel i sur., 2015.)

Svojstva	Eurodizel	Otpadno jestivo ulje
Kemijska formula	$C_{12}H_{23}$	$C_{17}H_{31}O_2$
Viskoznost (N/ms)	5,2 (pri 25 °C)	4,9 (pri 25 °C)
Kalorična vrijednost (KJ/Kg)	42000	42650
Gustoća (Kg/Kg)	834	862,6
Cetanski broj	46	48,7
Flash point temperatura (°C)	53°C	160°C
Udio sumpora (mg/kg)	57	8
Udio ugljika (%)	86,2	76,4
Udio pepela (%)	0,008	0,0258

U tablici 2.1. je vidljivo da su svojstva biogoriva proizvedenog od otpadnog jestivog ulja vrlo blizu vrijednostima standardnog dizel goriva. Istraživanje je provedeno na četverotaktnom jednocilindričnom motoru hlađenim vodom koji je direktno spojen na kočnicu te računalo za mjerenje izlaznih podataka (slika 5.). Svi parametri motora su mjereni na 1500 o/min, a stupanj kompresije motora je iznosio 18:1.



Slika 5. Prikaz sustava korištenog pri testiranju
(Izvor: Patel i sur., 2015.)

Rezultati su pokazali da biodizel proizveden od otpadnog jestivog ulja pomiješan sa standardnim dizelom u raznim omjerima (od B10 do B30) može biti korišten kao pogonsko gorivo za dizel motor bez modifikacija na motoru. Povećanjem koncentracije biodizela u mješavini došlo je do smanjenja toplinske učinkovitosti, mješavina B10 je pokazala karakteristike najbliže standardnom dizel gorivu. Specifična potrošnja goriva je povećana kod svih omjera mješavine dok je B30 najbliža dizel gorivu. Mehanička učinkovitost je najbliža dizelu kod mješavine B20.

- Naima i Liaqid (2013.) su u svome radu na temu otpadnih ulja u svojstvu pogonskog goriva za dizel motore usporedili značajke otpadnog jestivog ulja sa standardnim dizel gorivom. Analizirali su nekoliko znanstvenih radova na temu emisija plinova, karakteristika motora i izgaranja otpadnog ulja. Što se tiče karakteristika motora zaključili su da otpadno jestivo ulje postiže brže paljenje od standardnog dizel goriva, tvrde da je razlog tome veći cetanski broj te veći postotak kisika kod mješavine goriva u usporedbi sa dizelom. U rezultatima rada govore o značajkama korištenja otpadnog jestivog ulja poput većeg viskoziteta, manje ogrijevne vrijednosti, većih temperatura ispušnih plinova, smanjenje udjela CO i HC te povećanje NO_x u ispuhu.

- Chiatti i sur. (2018.) istraživali su utjecaj postotka otpadnog jestivog ulja u mješavini s dizelom na karakteristike motora i emisije ispušnih plinova na novijem common rail dizel motoru. Za testiranje je korišten dvocilindrični četverotaktni common rail motor spojen na kočnicu te uređaje za prikupljanje podataka. Radi slabije kvalitete korištenog ulja u usporedbi sa biljnim uljem otpadno ulje je bilo potrebno pročititi od nečistoća poput dijelova hrane, vode te masnih kiselina nakon čega je moguće provesti proces transesterifikacije. Ulje je korišteno u omjerima B20 (20% otpadnog jestivog ulja u mješavini sa dizelom) te B40 (40% otpadnog jestivog ulja u mješavini sa dizelom) što je ujedno i najveći mogući udio kod kojeg ne dolazi do degradacije gumenih dijelova motora (tablica 2.2.).

Tablica 2.2. Svojstva dizel goriva u usporedbi sa biodizelskim gorivom proizvedenim od otpadnog ulja (Izvor: Chiatti i sur., 2018.)

Svojstva	Otpadno jestivo ulje	Eurodizel
Gustoća (kg/m ³ pri 15°C)	830	877
Viskoznost (N/ms)	2,5 (pri 40°C)	4,4 (pri 40°C)
Kalorična vrijednost (MJ/kg)	43,1	37,1
Cetanski broj	52	56,0

Rezultati testiranja su pokazali da s povećanjem udjela otpadnog jestivog ulja u mješavini dolazio do smanjenja vrijednosti okretnog momenta na svim testiranim okretajima motora. Specifična potrošnja goriva se povećavala sa udjelom otpadnog jestivog ulja, prosječno u iznosu od 3,9% za B20 mješavinu te 7,1% za B40 mješavinu. Temperatura ispušnih plinova se smanjivala sa udjelom biodizelskog goriva u mješavini. Emisije NO_x su se pokazale najveće kod B40 mješavine, dok su emisije CO i HC bile manje u usporedbi sa standardnim dizel gorivom. Koncentracija krutih čestica u ispuhu se smanjivala sa povećanjem udjela otpadnog jestivog ulja.

3. Hipoteze i cilj rada

Istraživanje polazi od hipoteze da je otpadno jestivo ulje moguće ekonomično reciklirati na način da se koristi kao pogonsko gorivo za poljoprivredne strojeve te tako utjecati na smanjenje štetnih emisija ispušnih plinova.

Cilj rada je utvrditi utjecaj dodavanja otpadnog jestivog ulja u dizelsko gorivo na karakteristike traktorskog motora i to:

- snagu, zakretni moment, potrošnju goriva te
- emisiju ispušnih plinova: CO, CO₂, HC, NO_x.

4. Materijali i metode rada

4.1. Karakteristike korištenog goriva

U istraživanju je korišteno standardno eurodizel gorivo u usporedbi s tri mješavine eurodizela sa otpadnim jestivim uljem u različitim omjerima (tablica 4.1.). Prva mješavina je sadržavala 10% otpadnog jestivog ulja (B10), druga mješavina 20% otpadnog jestivog ulja (B20) i treća mješavina 30% otpadnog jestivog ulja (B30). Korišteno otpadno ulje potječe iz studentskog restorana Agronomskog fakulteta.

Tablica 4.1. Granične vrijednosti sastavnica i značajki kvalitete dizelskog goriva koje se stavlja na tržište Republike Hrvatske (Izvor: Narodne novine 57/2017)

Sastavnica i značajka kvalitete	Jedinica	Granične vrijednosti	Metoda ispitivanja
Cetanski broj		> 51,0	HRN EN ISO 5156 HRN EN 15195 HRN EN 16144 ASTM D 613 HRN EN ISO 3675
Gustoća pri 15°C	kg m ⁻³	< 845,0	HRN EN ISO 12185 ASTM D 1298 ASTM D 4052
Destilacija: - 95 % (v/v) predestilirano do:	°C	< 360,0	HRN EN ISO 3405 ASTM D 86
Policiklički aromatski ugljikovodici	% m m ⁻¹	< 8,0	HRN EN 12916 HRN EN ISO 20846
Količina sumpora	mg kg ⁻¹	< 10,0	HRN EN ISO 20884 HRN EN ISO 14596 HRN EN ISO 13032 ASTM D 5453
Količina metil ester masnih kiselina FAME	% v v ⁻¹	< 7,0	HRN EN 14078
Točka filtrabilnosti za razdoblje: 16.4 - 30.9. 1.10. - 15.11. 1.3. - 15.4. 16.11 - 29.2	°C	< 0 < -10 < -10 < -15	HRN EN 116

4.2. Karakteristike motora

Karakteristike motora uz upotrebu dizel goriva s dodanim različitim udjelima rabljenog jestivog ulja analizirane su na četverocilindričnom dizel agregatu Torpedo F4L912 T3Z (licenca Deutz) koji je ugrađen u traktor tipa Torpedo D 7506 A (slika 6.).



Slika 6. Torpedo TD 7506 A

(Izvor: Goran Fabijanić)

Deklarirana nazivna snaga motora od strane proizvođača iznosi 55 kW pri 2400 o/min, a maksimalni zakretni moment 243 Nm pri 1600 o/min. Ostale tehničke značajke ispitivanog motora prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Tehničke značajke ispitivanog dizel motora

Tip motora	Četverotaktni dizel
Model motora	F4L 912
Način ubrizgavanja goriva	Direktno ubrizgavanje
Hlađenje	Zrakom
Usis zraka	Atmosferski
Provrt	100 mm
Hod	120 mm
Radni obujam	3768 cm ³
Stupanj kompresije	17:1
Broj ventila po cilindru	2
Visokotlačna pumpa za gorivo	Linijaska
Tlak ubrizgavanja goriva	175 bara

Ispitivanje je obavljeno u laboratoriju za ispitivanje motora Zavoda za mehanizaciju poljoprivrede. Prvi dio istraživanja obuhvatio je ispitivanje karakteristika motora. Motor je priključen preko priključnog vratila traktora na hidrauličku kočnicu Schenk tip U1-40 (točnost < 1%) (slika 7.).



Slika 7. Hidraulična kočnica Schenk tip U1-40
(Izvor: Goran Fabijanić)

Tijekom ispitivanja mjerena je sila kočenja, broj okretaja i satna potrošnja goriva. Satna potrošnja goriva mjerena je volumetrijskom metodom korištenjem trbušaste pipete volumena 100 ml mjerenjem vremena u kojem je utrošen poznati volumen goriva. Iz dobivenih podataka su izračunate vrijednosti za snagu i zakretni moment motora, te specifičnu potrošnju goriva. Broj okretaja motora mjenen je pomoću digitalnog mjerača broja okretaja Lutron DT 2236 (točnost $\pm 0,05\%$). Za vrijeme ispitivanja je praćena i temperatura ulja u motoru uređajem MGT 300 EVO. Podaci o okolišnim uvjetima (temperatura, relativna vlažnost i tlak zraka) potjeću sa meteorološke postaje Državnog hidrometeorološkog zavoda Zagreb-Maksimir koja se nalazi u blizini laboratorija u kojem je provedeno ispitivanje. Prosječna temperatura tijekom ispitivanja iznosila je 15,2 °C, relativna vlažnost zraka 56,0%, a tlak zraka 1019,2 hPa.

Istraživanje karakteristika dizel motora korištenjem razlićitih vrsti goriva provedeno je prema OECD Code 2 pravilniku za službeno ispitivanje karakteristika poljoprivrednih i šumskih traktora (slika 8.). Prvi dio mjerenja je obuhvatilo 6 toćaka ispitivanja u regulatorskom dijelu krivulje s maksimalno aktiviranom polugom akceleratora.



Slika 8. Mjerenje karakteristika motora
(Izvor: Goran Fabijanić)

Točka 1 predstavlja nazivnu (nominalnu) snagu motora, a mjeri se kod nazivnog broja okretaja. Točka 2 je snaga ostvarena kod 85% zakretnog momenta ostvarenog u točki P1. Točka 3 je snaga ostvarena kod 75% zakretnog momenta ostvarenog u točki 2. Točka 4 je snaga ostvarena kod 50% zakretnog momenta ostvarenog u točki P2. Točka 5 je snaga ostvarena kod 25% zakretnog momenta ostvarenog u točki P2. Točka 6 predstavlja karakteristike neopterećenog motora. Daljnje mjerenje je provedeno na dodatnih 5 točaka u području krivulje od nazivne snage do maksimalnog momenta mjerenim na svakih 200 okretaja motora u minuti (7 – izmjerene vrijednosti na 2000 min^{-1} , 8 – na 1800 min^{-1} , 9 – na 1600 min^{-1} , 10 – na 1400 min^{-1} , 11 – na 1200 min^{-1}).

4.3. Ispušni plinovi

Drugi dio istraživanja obuhvatio je analizu ispušnih plinova dizel motora prema standardu ISO 8178-4:2007 tip C1 koji predviđa analizu ispušnih plinova u 8 točaka mjerenja pri različitim postavkama ispitivanog motora (slika 9.).

Točka 1 predstavlja mjerenje kod maksimalne snage pri nazivnom broju okretaja motora. Točka 2 na 75% momenta izmjerenog u točki 1 pri nazivnom broju okretaja motora. Točka 3 na 50% momenta izmjerenog u točki 1 pri nazivnom broju okretaja motora. Točka 4 na 10% momenta izmjerenog u točki 1 pri nazivnom broju okretaja motora. Točka 5 predstavlja mjerenje kod maksimalnog momenta. Točka 6 na 75% maksimalnog momenta izmjerenog u točki 5 pri broju okretaja motora kod ostvarenog maksimalnog momenta. Točka 7 na 50% maksimalnog momenta izmjerenog u točki 5 pri broju okretaja motora kod ostvarenog maksimalnog momenta. Točka 8 predstavlja mjerenje neopterećenog motora kod minimalnog broja okretaja motora.

Analiza ispušnih plinova provedena je analizatorom Maha MET 6.3 (Maha Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG., Haldenwang, Germany)(slika 10.). Mjerne karakteristike analizatora ispušnih plinova su navedene u tablici 4.3. Kod svih mjerenja dobivene vrijednosti predstavljaju prosjek od 4 mjerenja provedenih u jednom satu. Statistička analiza provedena je korištenjem Excel programa.

Tablica 4.3. Mjerne karakteristike analizatora ispušnih plinova Maha MET 6.3

Ispušni plinovi	CO	CO ₂	HC	O ₂	NO _x	PM
Mjerno područje	0 – 15,0 vol.%	0 – 20,0 vol.%	0 – 2000 ppm (heksan) 0 – 4000 ppm (propan)	0 – 25,0 vol.%	0 – 5000 ppm	1 – 1100 mg m ⁻³
Točnost mjerenja	0,03 vol.%	0,5 vol.%	10 ppm	0,1 vol.%	32 – 120 ppm	N/A
Preciznost mjerenja	0,001 vol.%	0,01 vol.%	0,1 ppm	0,01 vol.%	1 ppm	1 mg m ⁻³
Metoda mjerenja	Infracrvena	Infracrvena	Infracrvena	Elektrokemijska	Elektrokemijska	Ekstinkcijska



Slika 9. Mjerenje ispušnih plinova sondom analizatora
(Izvor: Goran Fabijanić)



Slika 10. Analizator Maha MET 6.3
(Izvor: Goran Fabijanić)

5. Rezultati i rasprava

5.1. Karakteristike motora

Rezultati provedenog istraživanja na dizel motoru su prikazani pomoću tablica te grafičkih dijagrama s podacima mjerenja u različitim točkama prema OECD Code 2 pravilniku za službeno ispitivanje karakteristika poljoprivrednih i šumskih traktora. Mjerene su četiri karakteristike motora: snaga, zakretni moment, satna potrošnja goriva te specifična potrošnja goriva.

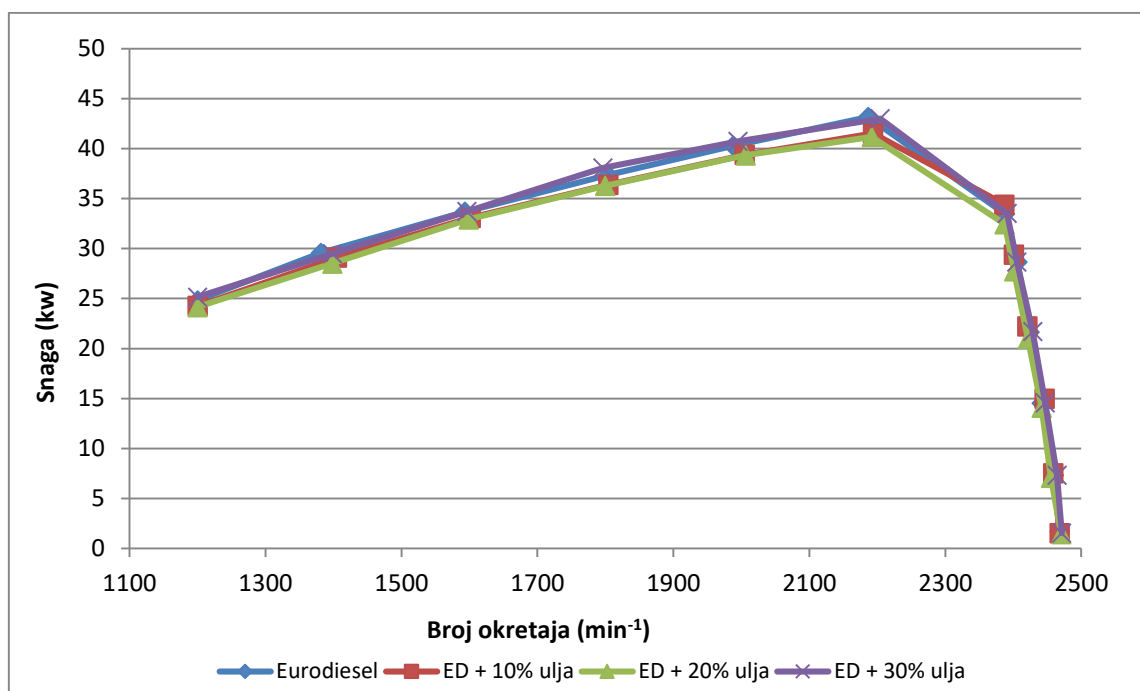
5.1.1. Snaga

Tablica 5.1. te grafikon 1. prikazuju snagu ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Već u prvoj točki P1 pri nazivnim okretajima motora izmjerene su vidljive razlike u snazi gdje je pri korištenju B10 mješavine ostvarena najveća snaga od 34,40 kw što je za 6% veća snaga u odnosu na najniži rezultat ostvaren pri korištenju B20 mješavine. Sličan rezultat se proteže u ostatku regulatorskog dijela krivulje (od P2 do P6) odnosno najbolji rezultati su postignuti korištenjem B10 mješavine dok su rezultati eurodizela i B30 mješavine identični, najniže vrijednosti ostvaruje B20. U točki P7 pri maksimalnoj snazi nisu primjećene značajne razlike između vrijednosti, najveća maksimalna snaga je izmjerena pri korištenju eurodizel goriva. Najbolji rezultati u području krivulje od nazivne snage do maksimalnog momenta mjerenim na svakih 200 okretaja motora ostvareni su korištenjem B30 mješavine a najlošiji korištenjem B20 mješavine. Prosječno je najbolji rezultat ostvaren korištenjem B30 mješavine, odnosno prosječni rezultat dobiven korištenjem eurodizela je lošiji za 0,37%. Najlošiji prosječni rezultat je ostvaren korištenjem B20 mješavine, u prosjeku je manji za 3,68% od rezultata B30 mješavine.

Tablica 5.1. Snaga motora s četiri različite vrste goriva po OECD točkama mjerenja

kw	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Prosjek
Eurodiesel	33,47	28,67	21,66	14,55	7,33	1,74	43,16	40,28	37,37	33,69	29,57	24,82	26,36
ED + 10% ulja	34,40	29,40	22,24	14,98	7,53	1,55	41,51	39,38	36,38	33,09	29,11	24,28	26,15
ED + 20% ulja	32,46	27,75	20,99	14,11	7,09	1,45	41,18	39,34	36,28	32,92	28,52	24,16	25,52
ED + 30% ulja	33,52	28,66	21,70	14,58	7,34	1,55	43,00	40,72	38,06	33,72	29,48	25,15	26,46

Legenda
Eurodiesel - standardno dizel gorivo
ED + 10% ulja - mješavina dizel goriva (90%) i otpadnog jestivog ulja (10%)
ED + 20% ulja - mješavina dizel goriva (80%) i otpadnog jestivog ulja (20%)
ED + 30% ulja - mješavina dizel goriva (70%) i otpadnog jestivog ulja (30%)



Grafikon 1. Snaga dizel motora pri korištenju četiri vrste goriva

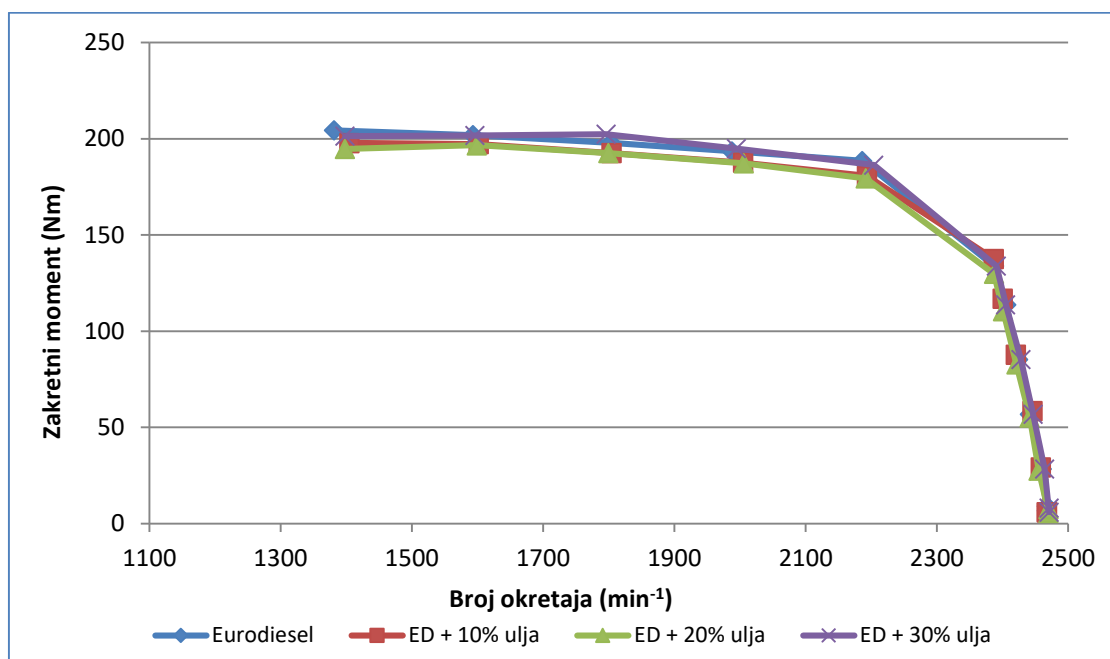
5.1.2. Zakretni moment

Tablica 5.2. i grafikon 2. prikazuju zakretni moment ostvaren prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Od točke P1 do točke P5 korištenjem eurodizela i B30 mješavine ostvareni su identični rezultati, u regulatorskom dijelu razika je vidljiva jedino u točki P6 gdje je bolji rezultat za 11,1% ostvaren korištenjem eurodizel goriva. Najveći zakretni moment ostvaren je korištenjem eurodizel goriva pri 1381,5 min⁻¹. Najniže vrijednosti zakretnog momenta u svim točkama mjerenja ostvarene su korištenjem B20 mješavine. Prosječne vrijednosti između eurodizela i B30 mješavine su približno jednake uz razliku od 0,15%.

Tablica 5.2. Zakretni moment s četiri različite vrste goriva po OECD točkama mjerenja

Nm	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Prosjek
Eurodiesel	133,88	113,81	85,34	56,90	28,46	6,74	188,48	193,48	197,86	201,90	204,41	197,54	134,07
ED + 10% ulja	137,62	116,95	87,74	58,48	29,25	5,99	180,69	187,56	192,54	197,22	197,84	193,18	132,09
ED + 20% ulja	129,81	110,34	82,76	55,16	27,58	5,62	179,43	187,24	192,54	196,60	194,73	192,24	129,51
ED + 30% ulja	133,88	113,81	85,34	56,90	28,44	5,99	186,30	194,92	202,35	201,71	201,34	200,16	134,26

Legenda
Eurodiesel - standardno dizel gorivo
ED + 10% ulja - mješavina dizel goriva (90%) i otpadnog jestivog ulja (10%)
ED + 20% ulja - mješavina dizel goriva (80%) i otpadnog jestivog ulja (20%)
ED + 30% ulja - mješavina dizel goriva (70%) i otpadnog jestivog ulja (30%)



Grafikon 2. Zakretni moment dizel motora pri korištenju četiri vrste goriva

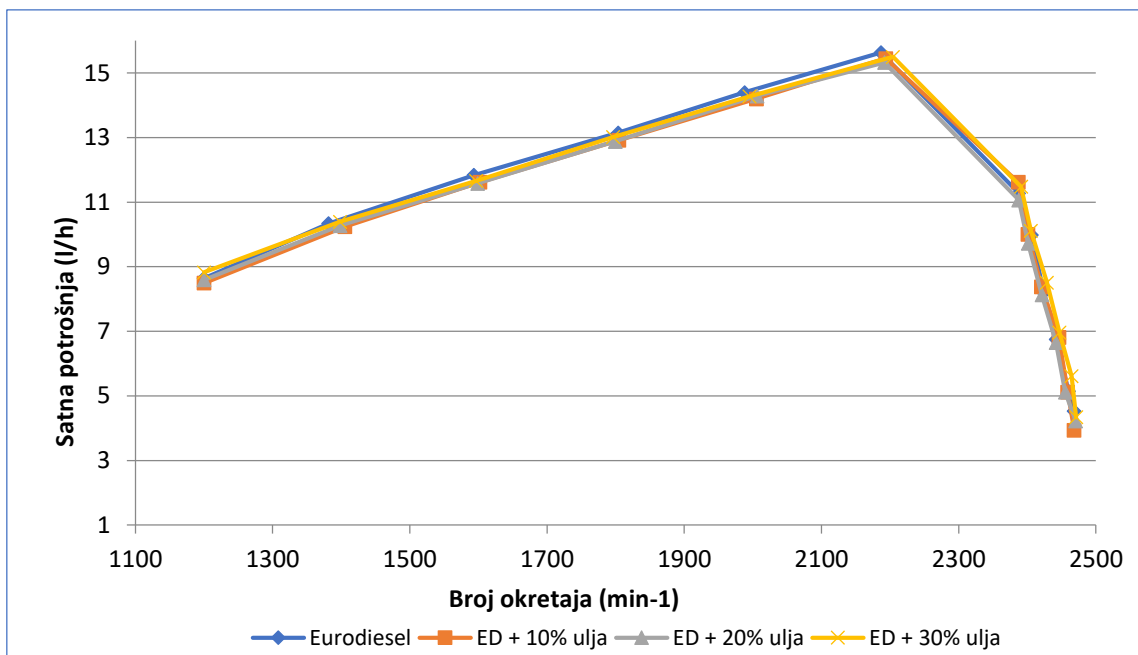
5.1.3. Satna potrošnja goriva

Tablica 5.3. i grafikon 3. prikazuju satnu potrošnju goriva ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Oscilacije u potrošnji pri korištenju četiri vrste goriva su minimalne bez obzira na točku mjerenja, najveća razlika je vidljiva u točki P6 kod neopterećenog motora gdje je korištenjem eurodizel goriva ostvaren rezultat veći za 15% u odnosu na B10 mješavinu. Najveća potrošnja ostvarena je korištenjem eurodizel goriva pri 2186 min⁻¹. U prosjeku najbolji rezultat ostvaren je korištenjem B20 mješavine dok je najlošiji korištenjem B30 mješavine, razlika između najboljeg i najlošijeg rezultata iznosi 2.39%.

Tablica 5.3. Satna potrošnja goriva s četiri različite vrste goriva po OECD točkama mjerenja

l/h	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Prosjek
Eurodiesel	11,28	9,99	8,20	6,75	5,15	4,53	15,63	14,40	13,15	11,84	10,34	8,64	9,99
ED + 10% ulja	11,62	10,01	8,38	6,81	5,12	3,94	15,45	14,20	12,92	11,62	10,24	8,49	9,90
ED + 20% ulja	11,07	9,73	8,13	6,66	5,11	4,22	15,33	14,29	12,88	11,58	10,28	8,59	9,82
ED + 30% ulja	11,48	10,11	8,51	6,96	5,61	4,34	15,50	14,27	13,02	11,66	10,39	8,83	10,06

Legenda
Eurodiesel - standardno dizel gorivo
ED + 10% ulja - mješavina dizel goriva (90%) i otpadnog jestivog ulja (10%)
ED + 20% ulja - mješavina dizel goriva (80%) i otpadnog jestivog ulja (20%)
ED + 30% ulja - mješavina dizel goriva (70%) i otpadnog jestivog ulja (30%)



Grafikon 3. Satna potrošnja dizel motora pri korištenju četiri vrste goriva

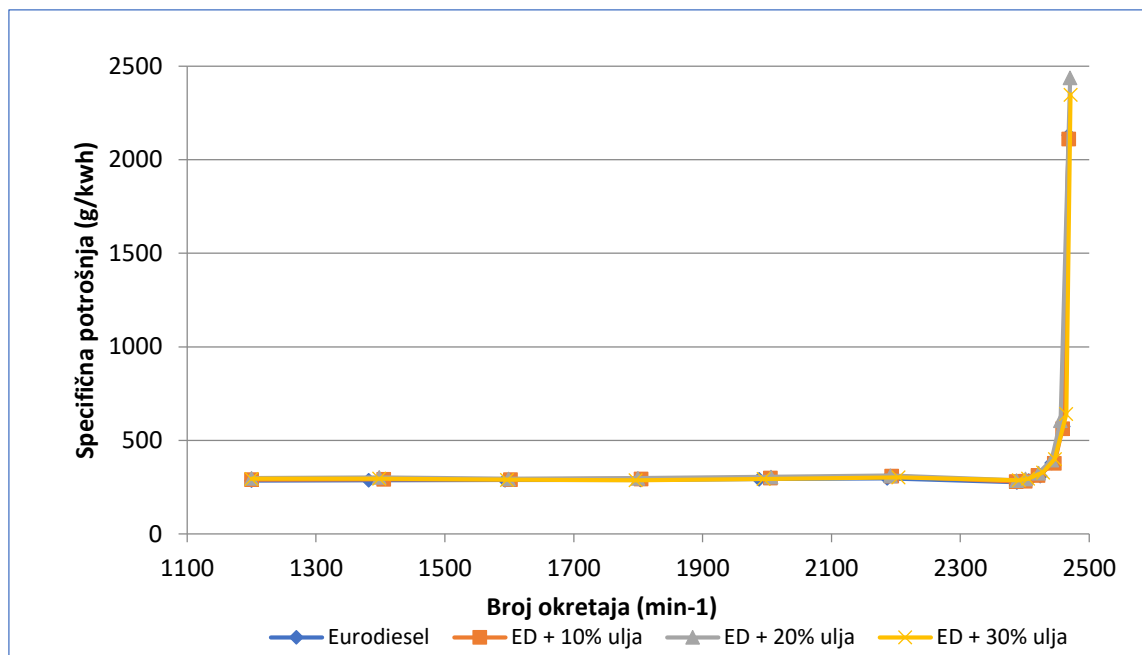
5.1.4. Specifična potrošnja goriva

Tablica 5.4. i grafikon 4. prikazuju specifičnu potrošnju goriva ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Najmanja specifična potrošnja goriva ostvarena je korištenjem eurodizela pri 2387 min^{-1} dok je najveća ostvarena korištenjem B20 mješavine pri 2468 min^{-1} . Najveće razlike između rezultata su vidljive u točkama P5 i P6 odnosno pri okretajima većim od 2400 min^{-1} . Najbolji rezultat u prosjeku ostvaren je korištenjem eurodizel goriva dok je prosječni rezultat korištenja B10 mješavine veći za 0,1%. Najveća specifična potrošnja goriva u prosjeku ostvarena je korištenjem B20 mješavine.

Tablica 5.4. Specifična potrošnja goriva s četiri različite vrste goriva po OECD točkama mjerenja

gkW-1h-1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Prosjek
Eurodiesel	276,28	285,58	310,40	380,40	575,76	2132,02	297,00	293,18	288,49	288,15	286,77	285,52	474,96
ED + 10% ulja	280,38	282,53	312,72	377,52	563,75	2111,35	308,94	299,29	294,67	291,42	292,01	290,44	475,42
ED + 20% ulja	286,08	294,21	324,88	395,95	604,95	2438,57	312,22	304,82	297,84	295,18	302,37	298,47	512,96
ED + 30% ulja	287,32	295,90	329,07	400,76	641,53	2348,57	302,34	294,10	286,89	290,06	295,74	294,46	505,56

Legenda
Eurodiesel - standardno dizel gorivo
ED + 10% ulja - mješavina dizel goriva (90%) i otpadnog jestivog ulja (10%)
ED + 20% ulja - mješavina dizel goriva (80%) i otpadnog jestivog ulja (20%)
ED + 30% ulja - mješavina dizel goriva (70%) i otpadnog jestivog ulja (30%)



Grafikon 4. Specifična potrošnja dizel motora pri korištenju četiri vrste goriva

5.2. Emisije plinova

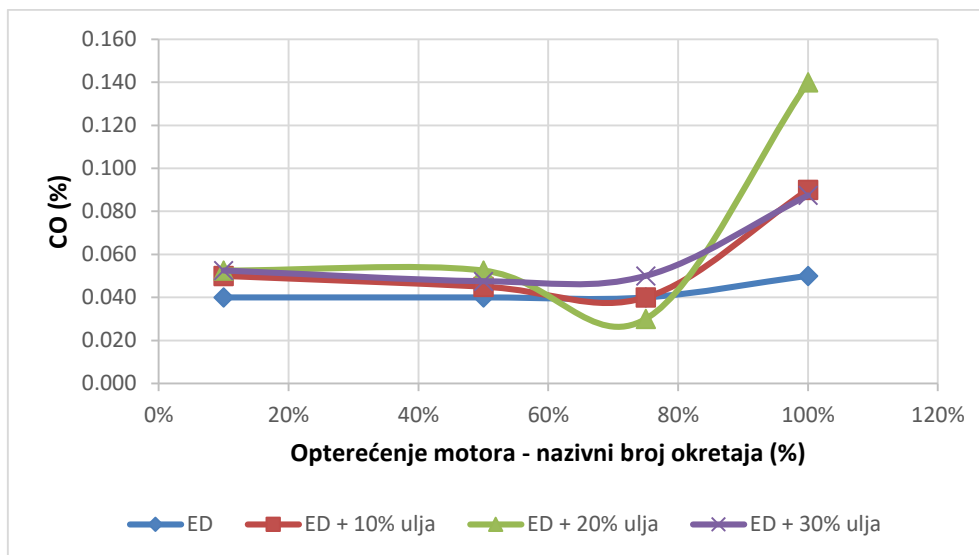
Rezultati provedenog istraživanja na dizel motoru su prikazani pomoću tablica te grafičkih dijagrama s podacima mjerenja u različitim točkama prema standardu ISO 8178-4:2007 tip C1 koji predviđa analizu ispušnih plinova u 8 točaka mjerenja pri različitim postavkama ispitivanog motora. Kod svih mjerenja dobivene vrijednosti predstavljaju prosjek od 4 mjerenja provedenih u jednom satu.

5.2.1. Emisija CO

Tablica 5.5. te grafikoni 5. i 6. prikazuju emisiju ugljičnog monoksida ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Emisije CO su približno jednake kod korištenja sve četiri vrste goriva pri nazivnom broju okretaja. Pri korištenju eurodizel goriva ostvarene su najmanje oscilacije u udjelu CO kroz sve točke mjerenja. Najbolji rezultat je ostvaren je u točki 2 na 75% momenta pri nazivnom broju okretaja motora korištenjem B20 mješavine. Pri najvećem opterećenju goriva ostvarene su i najveće razlike u rezultatima gdje je najbolji rezultat postignut korištenjem eurodizel goriva dok je najlošiji ostvaren pri korištenju B20 mješavine.

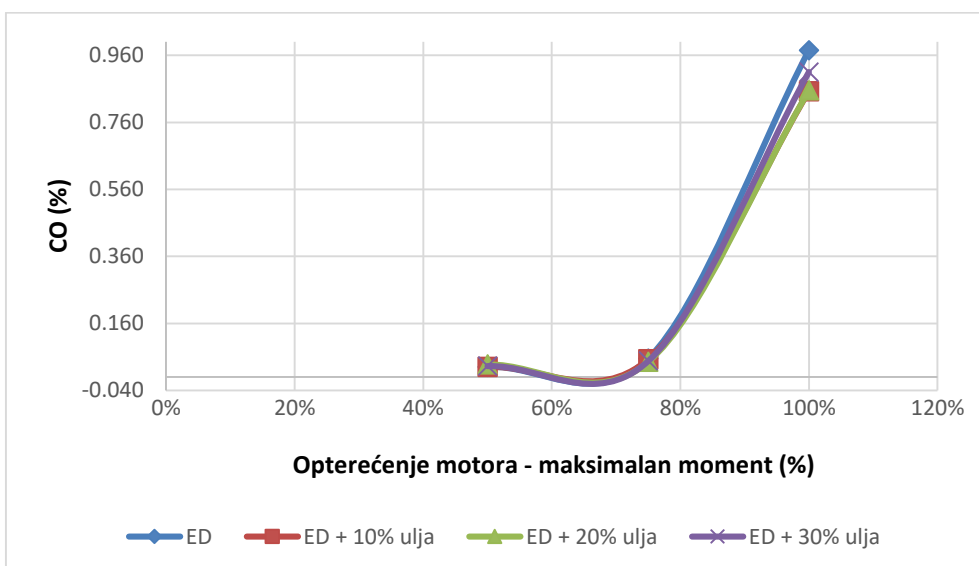
Tablica 5.5. Emisije ugljičnog monoksida u različitim točkama mjerenja prema standardu ISO 8178-4:2007 tip C1

CO (%)	Opterećenje (%)	ED	ED + 10% ulja	ED + 20% ulja	ED + 30% ulja
Nazivni broj okretaja	10%	0,040	0,050	0,053	0,053
	50%	0,040	0,045	0,053	0,048
	75%	0,040	0,040	0,030	0,050
	100%	0,050	0,090	0,140	0,088
Maksimalni moment	50%	0,030	0,030	0,038	0,033
	75%	0,055	0,053	0,045	0,048
	100%	0,975	0,853	0,855	0,910



Grafikon 5. Emisije ugljičnog monoksida pri nazivnom broju okretaja

Pri maksimalnom momentu i najvećem opterećenju motora dolazi do značajnijih razlika gdje je najbolji rezultat ostvaren korištenjem B10 mješavine a najlošiji korištenjem eurodizel goriva, razlika iznosi 14,4%.



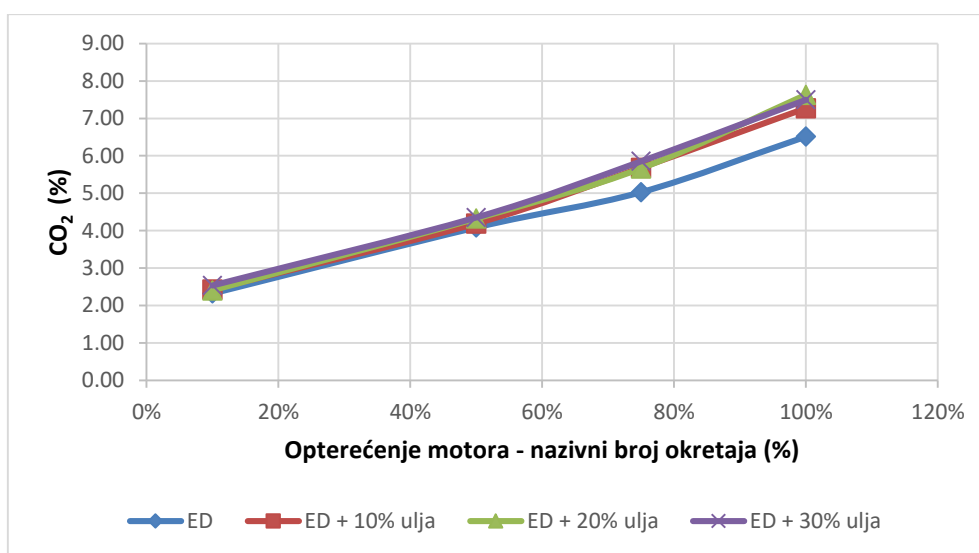
Grafikon 6. Emisije ugljičnog monoksida pri maksimalnom momentu

5.2.2. Emisija CO₂

Tablica 5.6. te grafikoni 7. i 8. prikazuju emisiju ugljičnog dioksida ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Iz rezultata se može zaključiti da emisije ugljičnog dioksida rastu s povećanjem opterećenja kod sve četiri vrste goriva. Pri maksimalnom momentu i najvećem opterećenju motora dolazi do najvećih emisija ugljičnog dioksida. Pri nazivnom broju okretaja najbolji rezultati su ostvareni korištenjem eurodizel goriva bez obzira na točku opterećenja.

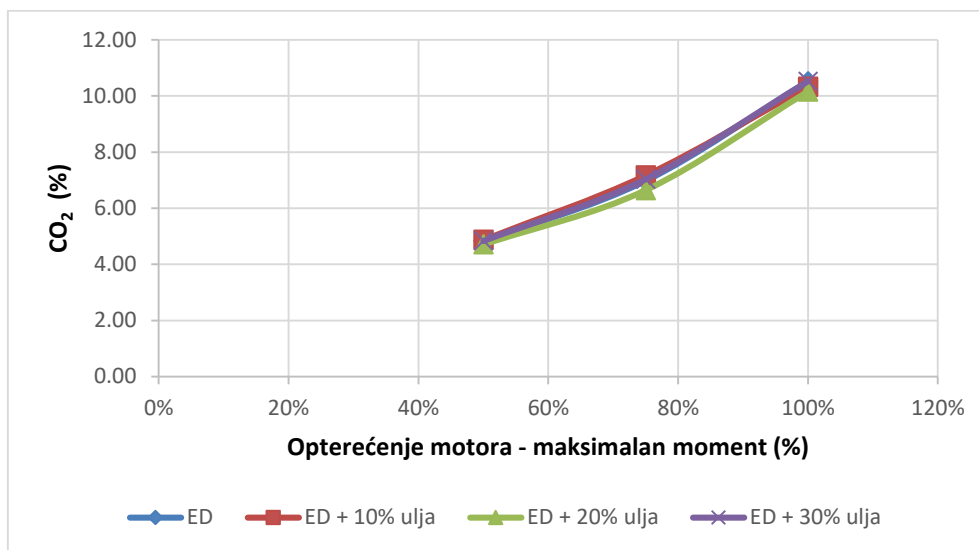
Tablica 5.6. Emisije ugljičnog dioksida u različitim točkama mjerenja prema standardu ISO 8178-4:2007 tip C1

CO ₂ (%)	Opterećenje (%)	ED	ED + 10% ulja	ED + 20% ulja	ED + 30% ulja
Nazivni broj okretaja	10%	2,32	2,43	2,41	2,54
	50%	4,09	4,19	4,32	4,36
	75%	5,03	5,68	5,67	5,86
	100%	6,51	7,27	7,63	7,50
Maksimalni moment	50%	4,82	4,87	4,71	4,84
	75%	6,98	7,17	6,65	7,03
	100%	10,52	10,33	10,16	10,52



Grafikon 7. Emisije ugljičnog dioksida pri nazivnom broju okretaja

Pri maksimalnom zakretnom momentu u svim točkama mjerenja najbolji rezultat je ostvaren korištenjem B20 mješavine.



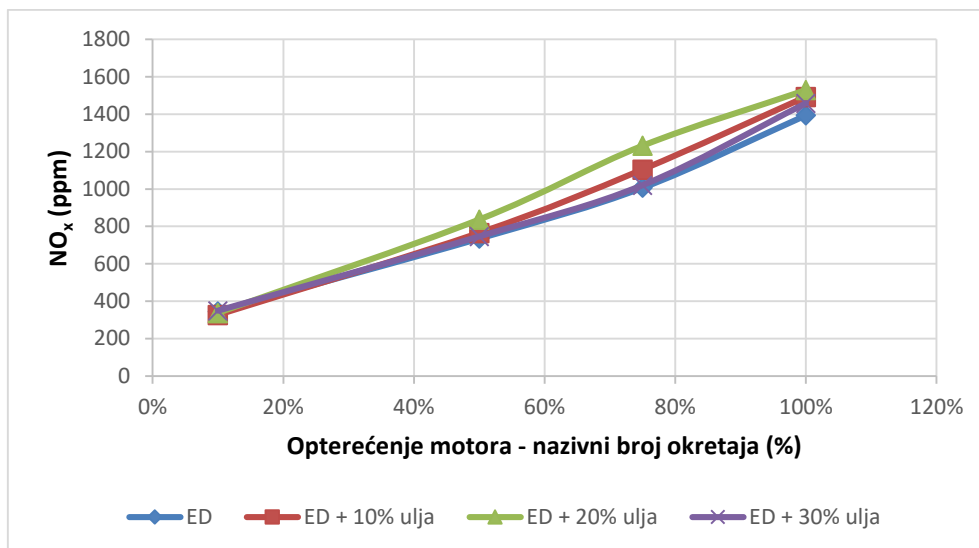
Grafikon 8. Emisije ugljičnog dioksida pri maksimalnom momentu

5.2.3. Emisija NO_x

Tablica 5.7. te grafikoni 9. i 10. prikazuju emisiju dušikovih oksida ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Pri nazivnom broju okretaja dolazi do povećanja emisija dušikovih oksida uz povećanje opterećenja, prosječno najbolji rezultati su ostvareni korištenjem eurodizel goriva. Do najvećih razlika dolazi pri opterećenju od 75% gdje je razlika između rezultata eurodizela i B20 mješavine 22,3%.

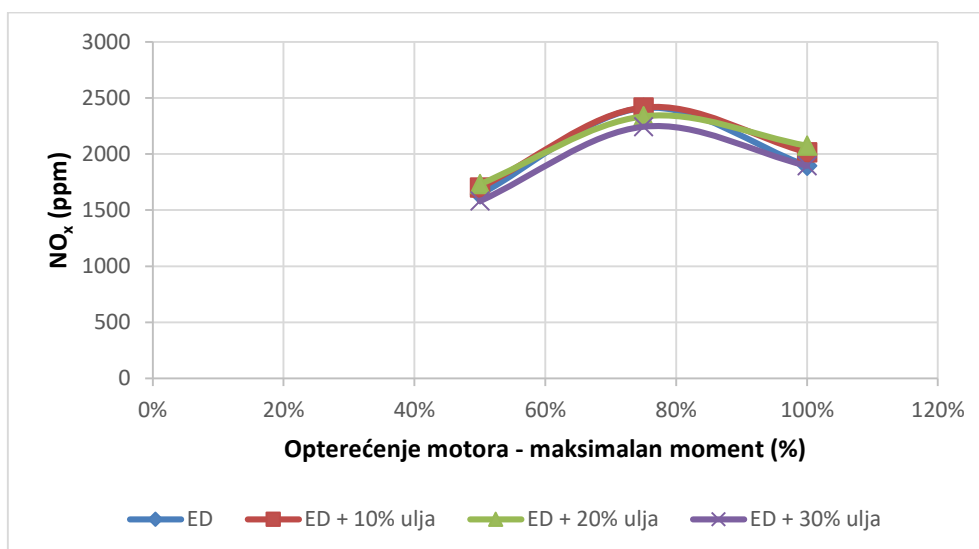
Tablica 5.7. Emisije dušikovih oksida u različitim točkama mjerenja prema standardu ISO 8178-4:2007 tip C1

NO _x (ppm)	Opterećenje (%)	ED	ED + 10% ulja	ED + 20% ulja	ED + 30% ulja
Nazivni broj okretaja	10%	345,75	327,5	337,25	349,5
	50%	735	765,5	837	746,25
	75%	1007	1104,25	1231,75	1020,5
	100%	1394,5	1492,25	1529,5	1458,5
Maksimalni moment	50%	1639,75	1700,25	1731,75	1581
	75%	2410	2414	2336,25	2242,25
	100%	1896	2014,5	2074,75	1895,5



Grafikon 9. Emisije dušikovih oksida pri nazivnom broju okretaja

Pri maksimalnom momentu najbolji rezultati u sve tri točke mjerenja najbolji rezultat je postignut korištenjem B30 mješavine dok je prosječno najlošiji rezultat postignut korištenjem B20 mješavine.



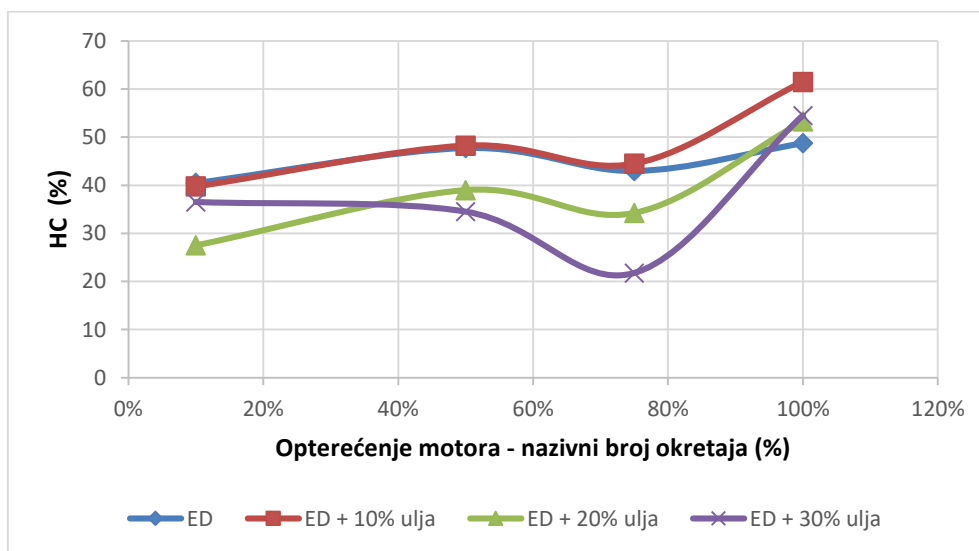
Grafikon 10. Emisije dušikovih oksida pri maksimalnom momentu

5.2.4. Emisija HC

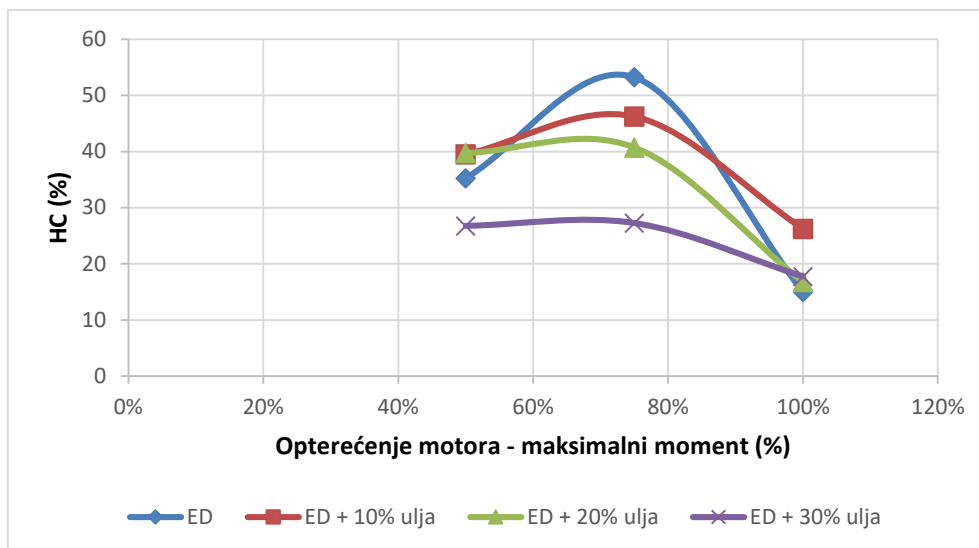
Tablica 5.8. te grafikoni 11. i 12. prikazuju emisiju ugljikovodika ostvarenu prilikom korištenja četiri vrste goriva: eurodizela, B10 (10% jestivog otpadnog ulja), B20 (20% jestivog otpadnog ulja) te B30 (30% jestivog otpadnog ulja). Prosječno najbolji rezultat ostvaren je korištenjem B30 mješavine dok je prosječno najlošiji rezultat ostvaren korištenjem B10 mješavine. Najbolji rezultat je ostvaren pri maksimalnom momentu i najvećem opterećenju korištenjem eurodizel goriva.

Tablica 5.8. Emisije dušikovih oksida u različitim točkama mjerenja prema standardu ISO 8178-4:2007 tip C1

HC (ppm)	Opterećenje (%)	ED	ED + 10% ulja	ED + 20% ulja	ED + 30% ulja
Nazivni broj okretaja	10%	40,5	39,75	27,5	36,5
	50%	47,75	48,25	39	34,5
	75%	43	44,5	34,25	21,75
	100%	48,75	61,5	53,25	54,5
Maksimalni moment	50%	35,25	39,5	39,75	26,75
	75%	53,25	46,25	40,75	27,25
	100%	15	26,25	16,75	17,75



Grafikon 11. Emisije ugljikovodika pri nazivnom broju okretaja



Grafikon 12. Emisije ugljikovodika pri maksimalnom momentu

5.3. Rasprava

Razne studije su se bavile istraživanjima na temu dodavanja jestivog otpadnog ulja u dizel gorivo te utjecaja takve mješavine na najvažnije karakteristike motora te emisije štetnih plinova. Abeda i sur. (2018.) u svome radu koriste otpadno jestivo ulje u omjerima B10, B20 i B30 te provode test na jednocilindričnom dizel motoru. Rezultati istraživanja su pokazali povećanu specifičnu potrošnju korištenjem mješavina koja se proporcionalno povećavala s udjelom otpadnog jestivog ulja u mješavini. Emisije CO₂ su se također povećavale s udjelom otpadnog jestivog ulja te su korištenjem dizela ostvarili najnižu prosječnu emisiju kao što je slučaj i u ovome radu. Pri najvećem opterećenju motora emisija CO₂ pri korištenju eurodizel goriva iznosi 3% dok pri korištenju mješavine s 30% udjela otpadnog ulja emisija iznosi 4%. Povećanje udjela otpadnog jestivog ulja je utjecalo na emisiju CO₂ i u ovome radu odnosno zabilježen je porast s 6,51% pri korištenja eurodizel goriva na 7,63% pri korištenju mješavine s 20% otpadnog jestivog ulja. Emisije NO_x su se povećale s opterećenjem motora, najniže emisije su postignute korištenjem dizel goriva, navode da je razlog veći udio kisika u mješavinama s otpadnim jestivim uljem. Najniža emisija pri najvećem opterećenju motora postignuta je korištenjem eurodizel goriva te je iznosila 68 ppm dok je najveća emisija od 102 ppm postignuta korištenjem mješavine s 30% otpadnog jestivog ulja. Ovaj rad potvrđuje povećanje emisije NO_x s povećanjem udjela otpadnog jestivog ulja, rezultati pokazuju 1394,5 ppm pri korištenju eurodizel goriva dok je pri korištenju mješavine s 20% otpadnog jestivog ulja izmjereno 1529,5 ppm. Emisije HC su smanjene korištenjem mješavina dok rezultati pri korištenju dizela pokazuju najveće emisije. Nadalje, Ulusoy i sur. (2018.) u svome radu potvrđuju minimalna odstupanja u snazi i zakretnom momentu motora pri korištenju otpadnog jestivog ulja u omjerima B10, B20, B30, B40 i B50 te uspoređujući ih sa dizel gorivom. Podaci mjerenja specifične potrošnje ponovno pokazuju povezanost udjela jestivog otpadnog ulja u mješavini i povećane potrošnje goriva. Mjerenja NO_x emisija dovode do zaključka da se emisija povećala s opterećenjem motora do 75% kod goriva sa dodanim otpadnim jestivim uljem dok na većim opterećenjima nije nastavljen trend rasta. Autori navode da je primjećen neznatčan pad emisije NO_x s povećanjem udjela otpadnog jestivog ulja u mješavini što je slučaj i u ovome radu ali suprotno od rezultata brojnih istraživanja na tu temu.

6. Zaključci

Temeljem provedenog istraživanja na četverocilindričnom dizel agregatu Torpedo F4L912 T3Z (licenca Deutz) može se zaključiti sljedeće:

- Prosječna snaga ostvarena korištenjem B30 mješavine otpadnog jestivog ulja bila je veća za 0,37% u odnosu na prosječni rezultat dobiven korištenjem eurodizela. Prosječno najlošiji rezultat ostvaren je korištenjem B20 mješavine, u odnosu sa B30 mješavinom rezultati se razlikuju za 3,7%.
- Rezultati mjerenja zakretnog momenta pokazuju zanemarive razlike u svim točkama mjerenja između eurodizel goriva i B30 mješavine, prosječna razlika iznosi 0,15% u korist B30 mješavine. Najniže vrijednosti zakretnog momenta u svim točkama ostvarene su korištenjem B20 mješavine, u odnosu sa B30 mješavinom rezultati su lošiji za 3,67%.
- Oscilacije u satnoj potrošnji pri korištenju četiri vrste goriva su minimalne bez obzira na točku mjerenja. U prosjeku najbolji rezultat ostvaren je korištenjem B20 mješavine dok je najlošiji korištenjem B30 mješavine, razlika između najboljeg i najlošijeg rezultata iznosi 2.39%. Satna potrošnja pri korištenju eurodizel goriva bila je veća za 1,7% u odnosu na rezultate B20 mješavine.
- Najbolji rezultat mjerenja specifične potrošnje goriva u prosjeku ostvaren je korištenjem eurodizel goriva dok je prosječni rezultat korištenja B10 mješavine veći za 0,1%. Najveća specifična potrošnja goriva u prosjeku ostvarena je korištenjem B20 mješavine.
- Emisije CO su približno jednake kod korištenja sve četiri vrste goriva, prosječno najbolji rezultat ostvaren je korištenjem B10 mješavine.
- Emisije CO₂ su približno jednake kod korištenja sve četiri vrste goriva, niti u jednoj točki mjerenja ne dolazi do značajnijih razlika. Prosječno najbolji rezultat je ostvaren korištenjem eurodizel goriva.
- Prosječno najbolji rezultati emisije NO_x ostvareni su korištenjem B30 mješavine, korištenjem eurodizel goriva prosječni rezultati su bili lošiji za 1,4%. Značajnije razlike su vidljive pri maksimalnom momentu.
- Prosječno najbolji rezultati emisije HC ostvareni su korištenjem B30 mješavine, u odnosu na eurodizel gorivo čijim korištenjem je ostvaren prosječan rezultat lošiji za 29,45%.

Literatura

1. Abeda, K. A., Morsib, A. K. El., Sayed, M. M., El Shaibd, A. A., Gade, M. S. (2018). Effect of waste cooking-oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Egyptian Journal of Petroleum* Volume 27, Issue 4, December 2018, Pages 985-989
2. Bibić, Dž., Filipović, I., Kegl, B., Pikula, B. (2011). Utjecaj biogoriva na performance dizelovog motora. *Goriva i maziva*, 50: 317-334.
3. Brdarić, D., Kralik, D., Zlatar, V., Kukić, S., Uranjek, N., Jovičić, D., Mihić, Đ. (2011) Otpadna jestiva ulja iz ugostiteljskih objekata skupine restorani. *Agronomski glasnik* 6/2011.
4. Bruwer J.J., Van der Boshoff B., Hugo F.J.C., Fuls J. (1981). The utilization of sunflower seed oil as renewable fuel diesel engines. Conference paper
5. Chiatti, G., Chiavola, O., Recco, E. (2018). Effect of waste cooking oil biodiesel blends on performance and emissions from a CRDI diesel engine. In: *Improvement Trends for Internal Combustion Engines* (Ceper, B.A. ed.) IntechOpen, 19-36.
6. Cvengroš, J., Cvengroševa, S. (2004). Used frying oils and fats and their utilization in the production of methyl esters of higher fatty acids. *Biomass and Bioenergy* 27, 173-181.
7. Demirbas, A. (2009). Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supersritical methanol transesterification. *Energy conversion and management* 50:923-927.
8. Izvješće komisije Europskom parlamentu i vijeću u skladu s člankom 9. Direktive 98/70/EZ o kakvoći benzinskih i dizelskih goriva (2017).
9. Jurac, Z. (2011). Optimiranje proizvodnje biodizela iz otpadnih jestivih ulja s obzirom na zahtjeve kvalitete. Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci.
10. Kleinova, A., Cvengroš, J. (2009). Utilization of used frying oils / fats in FAME production. 44 th International Petroleum Conference.
11. Kondić V., Višnjić V., Pisačić K., Bojanić B. (2015). Prednosti i nedostaci proizvodnje i primjene biodizelskog goriva. *Stručni članak Tehnički glasnik* 9, 3(2015), 260-263.
12. Kulkarni, M.G., Dalai, A.K. (2006). Waste cooking oil – an economical source for biodiesel: a review. *Industrial & engineering chemistry research* 45 (9):2901-2913
13. Mustapić Z., Krička T., Stanić Z. (2006). Biodizel kao alternativno motorno gorivo. *Energija* 55, br.6.:634-657.
14. Naima, K., Liaqid, A. (2013). Journal Waste oils as alternative fuel for diesel engine: A review. *Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels*. 4. 10.5897/JPTAF11.001.
15. Patel, M. J., Patel, T. M., Rathod, G. R. (2015). Performance Analysis of C.I. Engine Using Diesel and Waste Cooking Oil Blend. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Volume 12, Issue 2 Ver. VI

16. Resitogl, I. A., Altinisik, K., Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Techn Environ Policy* 17:15–27
17. Rujnić-Sokele, M. (2011). Jesu li biogoriva dobra ili loša za okoliš? *Polimeri* 32
18. Tutunea, D., Dumitru I. (2017). Analysis of performance and emissions of diesel engine using sunflower biodiesel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 252
19. Ulusoy, Y., Arslan, R., Tekin, Y. (2018). Investigation of performance and emission characteristics of waste cooking oil as biodiesel in a diesel engine. *Petroleum Science.* 15. 1-9.
20. Volmajer, M., Kegl, B. (2003). Biodizel i otpadno jestivo ulje kao alternativna goriva: analiza s aspekta procesa ubrizgavanja. *Goriva i maziva*, 42, 3: 177-197.